

## 高分辨率复杂电极系的高效数值模拟\*

杨 峰\*\* 聂在平 阮颖铮

(电子科技大学微波工程系 成都 610054)

**【摘要】** 文中讨论了一种高分辨率组合侧向电极系。利用高效的数值模式匹配方法并结合表面积分方程,对其进行了数值模拟。其结果表明,该电极系不但具有很高的纵向分辨率,而且也具有较深的径向探测深度,较好地解决了纵向分辨率与径向探测深度之间的矛盾,同时一次测量还可获得更多的地层信息。

**关键词** 数值模式匹配; 高分辨率; 组合侧向; 数值模拟

**中图分类号** TN011; TE19

非均匀介质中的场与波在电磁辐射、散射与传播、地球物理勘探、集成光学、目标识别、成像技术和生物工程等领域均有广泛应用。在这些相关领域中,石油地质勘探是一个与国民经济紧密相关的重要领域。石油测井在油藏勘探、油藏评价和生产中都是必不可少的,而电法测井又是石油测井的重要方法之一。

薄层、薄互层作为一种潜在的油气储集层,它对油气的评估、油井的充分利用和产量的提高都具有很大的促进作用。在测井界广泛使用的双侧向电极系的深、浅侧向的纵向分辨率仅为 66 cm; 三侧向虽然具有很好的纵向分辨率,但其受井眼影响大;微侧向和微球形聚焦电极系等虽有很高的纵向分辨率,但它们的径向探测深度比较浅,受泥饼、冲洗带影响大,很难探测到目的层电阻率。近年出现的薄层电阻率测井仪(TBR1)不仅有很高的纵向分辨率,而且也有较深的径向探测深度,但井眼井壁不规则或出现垮塌时,它很难贴至井壁上。本文提出了组合侧向电极系的方案,它具有比双侧向<sup>[3]</sup>、三侧向<sup>[4]</sup>电极系更多的有源激励电极和更为复杂的聚焦条件,所以处理该电极系要远比普通的侧向电极系复杂;另外,电极系尺寸也比较大,有的电极尺寸能达到几米长,因此不能象处理电磁波测井那样将电极作为偶极子来处理。本文还将采用高效的数值模式匹配法并结合表面积分方程来对组合侧向电极系的测井响应进行高效数值分析,以定量评估这种新型电极系。

### 1 数值模式匹配方法

由于电法测井中侧向电极系所使用的频率很低,它所产生的场可近似地看成是准静场。由于介质结构和δ环电极都是轴对称的,在圆柱坐标系中,位场的微分方程为

$$\frac{1}{de} \frac{\partial}{\partial d} (de \frac{\partial H}{\partial d}) + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = - \frac{I W(d-d_0) W(z-z_0)}{2cde} \quad (1)$$

式中  $e = e(d, z)$  为介质的电导率分布。在一柱面分层介质中,位场可以表示为本征模式的叠加形式,则有

1996年 8月 29日收稿,1996年 10月 9日修改定稿

\* 国家自然科学基金资助项目

\*\* 男 34岁 博士生

$$H(d, z) = \sum_{\Gamma=1}^N a_{\Gamma}^T f_{\Gamma}(d) \exp(\pm k_{z\Gamma} z) \quad (2)$$

选取一组适当的分域基函数  $\{g_n(d)\}$  来表示  $f_a(d)$ , 则有

$$f_{\Gamma}(d) = \sum_{\Gamma=1}^N b_{\Gamma n} g_n(d) \quad (3)$$

将式 (2)、(3) 代入式 (1) 可得矩阵形式的本征值方程

$$[\mathbf{B} + k_{z\Gamma}^2 \mathbf{G}] \cdot \mathbf{b}_{\Gamma} = 0 \quad (4)$$

解式 (4) 的本征值方程, 便可求得  $N$  个本征值  $k_{z\Gamma}^2$  和本征矢量  $\mathbf{b}_{\Gamma}$ , 由此得到  $z$  向无限厚,  $d$  向有分层的本征模式  $f_{\Gamma}(d)$ 。

将式 (2) 表示场匹配于  $(d, z')$  处  $W$  环电极的激励条件, 可求得系数  $\mathbb{T}_{\Gamma}$ , 于是  $z$  向均匀介质中位场  $H(d, z)$  即可表示为下列数值本征模式叠加形式

$$H(d, z) = - \frac{\sum_{\Gamma=1}^N \mathbb{T}_{\Gamma} f_{\Gamma}(d)}{4 \sum_{\Gamma=1}^N k_{z\Gamma} D_{\Gamma}} \exp(k_{z\Gamma} |z - z'|) f_{\Gamma}(d) \quad (5)$$

当介质具有  $z$  向平面分层时, 只须引入广义反射矩阵和广义透射矩阵来描述各模式在反射和透射时产生的模式耦合以及界面多次反射效应<sup>[2]</sup>。至此, 我们解决了二维轴对称的位场问题

## 2 组合侧向电极系的工作原理及积分方程的建立

该组合电极系主要是工作在双侧向环境下, 它是在双侧向电极系的第一屏蔽电极和第二屏蔽电极之间增加三个电极, 如图 1 所示。图中  $A_0$  是主电极; 对称排列  $M_2$ 、 $M_1$  和  $N_3$ 、 $N_1$  是两对监督电极;  $A_3$ 、 $A_1$ 、 $A_2$  是两对屏蔽电极, 而  $A_{11}$ 、 $A_{12}$  是  $A_{10}$  电极的屏蔽电极。

工作时, 主电极  $A_0$  发出主电流  $I_{A_0}$ , 两对屏蔽电极发出极性相同电流, 通过电子线路的自动调节, 使屏蔽电极保持一定的比例关系

$$H_{A_2} = \mathbb{V} H_{A_1} \quad (6)$$

式中  $\mathbb{V}$  是事先给定的,  $\mathbb{V} = 1, 0$  分别对应电极系的深、浅测。

在深、浅测两种工作状态下, 一旦电极系被调到平衡, 那么两对监督电极  $M_1$  和  $N_1$  (或  $M_2$  和  $N_2$ ) 上电位相等。即

$$H_{M_i} = H_{N_i} \quad i = 1, 2 \quad (7)$$

此时主电流  $I_{A_0}$  不会顺着井眼流动。深测时, 两对屏蔽电极电流将迫使主电极电流流入地层, 同样也迫使  $A_{10}$  电极电流呈盘状进入地层; 浅测时, 由于  $A_2$  电位为零, 使主电极电流和  $A_{10}$  电极电流呈发散形式进入地层。

在平衡状态下, 只要测出监督电极电位  $H_M$ , 第一屏蔽电极电位  $H_A$  和主电极电流  $I_{A_0}$ ,  $A_{10}$  电极电流  $I_{A_{10}}$ , 便可得到地层介质的视电阻率

$$R_a = k_0 \frac{H_M}{I_{A_0}} \quad (8)$$

$$R_a = k_1 \frac{H_A}{I_{A_0}} \quad (9)$$

式中  $k_0$ 、 $k_1$  分别是双侧向和组合侧向电极系系数。

由上述的工作原理, 可以写出该电极系的电流、电位关系, 由文献 [3] 可知, 它们都是积分方程

$$H_{A_2} = \mathbb{V} H_{A_1} \quad (10)$$



图 1 高分辨组合侧向电极示意图

$$H_{M_2} = H_{N_2} \quad (11)$$

$$H_{M_1} = H_{N_1} \quad (12)$$

$$H_{M_2} = H_{M_1} \quad (13)$$

$$H_{A_0} = 1 \quad (14)$$

$$H_{M_1} = H_{N_1} \quad (15)$$

$$H_{M_2} = \sqrt{H_{A_1}} \quad (16)$$

$$H_{A_{11}} = H_{A_1} \quad (17)$$

$$H_{A_{10}} = H_{A_1} \quad (18)$$

$$H_{A_{12}} = H_{A_1} \quad (19)$$

$$I_{M_2} + I_{M_1} = 0 \quad (20)$$

$$I_{N_2} + I_{N_1} = 0 \quad (21)$$

其中,式(10)~(16)表示两对屏蔽电极的给定关系;式(11)~(15)表示电极系的平衡状态;式(12)~(13)表示对称电极的短路关系;式(17)~(19)则表示组合电极之间的等位关系;式(14)表示主电极电位为 1 V;而式(20)~(21)表示上、下监督电极短路后流进和流出电流之和为零。联立求解以上 12 个积分方程,即可求得各电极上的电流和电位,由式(8)~(9)便可求出介质的视电阻率。

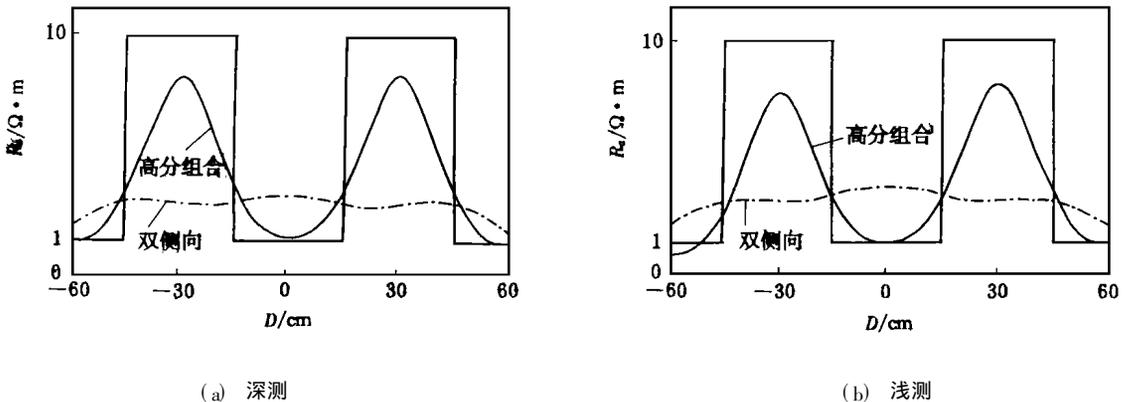


图 2 无侵入薄互层组合侧向数值模拟响应 ( $R_m = 0.1 \Omega \cdot m$ ,  $D_n = 20 \text{ cm}$ )

### 3 数值模拟结果和结论

由上述的电极系电流、电位的积分方程及数值模式匹配方法,我们编制了相应的数值模拟软件。图 2 是无侵入的薄互层,介质参数是层厚为 30 cm,泥浆电阻率  $R_m = 0.1 \Omega \cdot m$ ,围岩电阻率  $R_s = 1 \Omega \cdot m$ ,目的层电阻率  $R_t = 10 \Omega \cdot m$ ,图 2a、2b 分别表示深、浅测,图中矩形框表示实际地层剖面,实线和虚线分别表示组合侧向响应和双侧向响应。从图中可看出双侧向的深、浅测是无法区分薄互层,组合侧向仍能清楚地反映出介质电阻率来。图 3 是某油井的地质结构,井眼内泥浆电阻率为  $R_m = 2 \Omega \cdot m$ ,层厚仅为 20 cm,井眼井径为 36 cm,高阻围岩电阻率  $R_s = 800 \Omega \cdot m$ ,低阻目的层电阻率  $R_t = 100 \Omega \cdot m$ 。图中实线为组合侧向,虚线是双侧向。由图表明,双侧向根本就反映不出薄互层来,组合侧向的浅测由于探测深度较浅,当井眼井径很大时,井眼泥浆分流作用非常明显,使它也不能反映真实地层,而组合侧向深测仍能反映出薄互层及各层电阻率变化趋势,识别出含油气的

## 低阻薄层

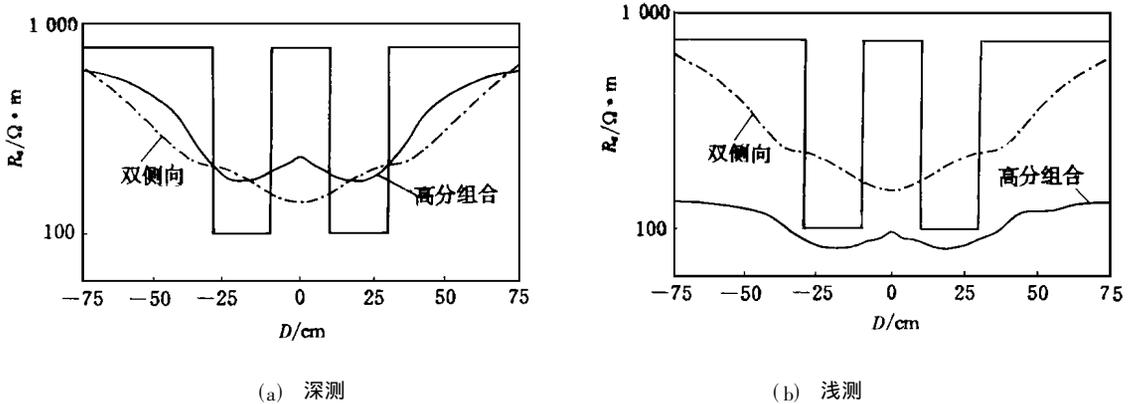


图 3 四川某油井实际剖面组合侧向数值模拟响应 ( $R_m = 2\Omega \cdot m$ ,  $D_h = 36\text{ cm}$ )

通过上述数值模拟结果表明,组合侧向电极系不仅在区分薄层、薄互层具有很高的分辨率,而且也具有较高的径向探测深度,同时还能多测两条响应曲线。这样做的好处是通过一次测量能够获得更多的地层信息,尤其在井眼井径比较小的情形,它可以比较清晰地反映侵入带的渐变过程。组合侧向电极系较好地解决了纵向分辨率和径向探测深度这对矛盾。

## 参 考 文 献

- 1 Chew W C. Wave and fields in inhomogeneous media. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990
- 2 聂在平,陈思渊,曾昭光等.二维全非均匀介质中位场格林函数的数值解.地球物理学报, 1994, 37(5): 688~ 697
- 3 聂在平,陈思渊.复杂介质环境中双侧向测井响应的高效数值分析.电子学报, 1994, 22(6): 30~ 38
- 4 杨 峰,聂在平.分层媒质中三侧向电阻率测井响应的高效数值分析.电子科技大学学报, 1996, 25(1): 23~ 28
- 5 Davies D H,尚作源译.新一代侧向测井仪:定向电阻率成像仪. 1993, 8(5): 1~ 12

## Numerical Simulation of High Resolution Hybrid Laterolog Tool

Yang Feng    Nie Zaiping    Ruan Yingzheng  
(Dept. of Microwave Eng., UEST of China Chengdu 610054)

**Abstract** In this paper, a new idea about the laterolog resistivity tool, namely the hybrid laterolog resistivity tool is introduced. The efficient numerical mode-matching method (NMM) combining with surface integral equation method can match the complex excited condition, and the hybrid laterolog response is rapidly calculated in a complex media. The result from the numerical stimulation shows that it has superior vertical resolution and deeper radial measuring depth than regular dual laterolog tool.

**Key words** numerical mode-matching method; high resolution; hybrid laterolog; numerical simulation